



Numerical Assessment of Land Degradation Considering the Land Subsidence Rate in 11 Watersheds of Iran

Maryam Naeimi^{1*} | Adel Jalili² | Reza Shahbazi³ | Samira Zandifar⁴ | Sakineh Lotfinasabasl⁵ | Azadeh Gohardoust⁶

1. Corresponding Author, Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. Email: naeimi@rifr-ac.ir
2. Botanical Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. Email: jalili@rifr-ac.ir
3. Geological and Mineral Exploration Organization, Tehran, Iran. Email: r_sh78@yahoo.com
4. Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. Email: Zandifar@rifr-ac.ir
5. Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. Email: lotfinasab@rifr-ac.ir
6. Desert Research Department, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. Email: azade.gohardoust@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received December 10, 2024
Revised February 09, 2025
Accepted March 02, 2025
Published online March 19, 2025

Keywords:
land degradation,
IMDPA,
Land subsidence,
Underground water resources.

ABSTRACT

Land degradation, caused by natural process or human activities, negatively affects the functioning of the ecosystem. Moreover, land subsidence due to excessive exploitation of groundwater, is a sign of land degradation. The aim of the present study is to investigate the numerical impact of land subsidence on land degradation in 11 watersheds using the original IMDPA model and the developed model called IMDPAS. For this purpose, the land subsidence database obtained in 2017 was classified for the first time using related images. Then, the information layer of quantitative and qualitative groundwater parameters, including the level of depletion, electrical conductivity, and sodium absorption ratio was classified. By combining all the parameters, the final land degradation severity map was concluded. Comparing the classification of land degradation in the two models indicated a 42% increase in land degradation severity class, with 37% falling into the moderate to severe category. This highlights the importance of changes in classification for each case. Finally, with regard to the model under study, and given the lack of a reference for the subsidence rate criterion, it is suggested that the final classification for the whole of Iran be completed through ongoing monitoring.

Cite this article: Naeimi, M.; Jalili, A.; Shahbazi, R.; Zandifar, S., Lotfinasabasl, S. & Gohardoost, A. (2024-25). Numerical Assessment of Land Degradation Considering the Land Subsidence Rate in 11 Watersheds of Iran. *Town and Country Planning*.16 (2), 363-382. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>



ارزیابی عددی تخریب سرزمین با در نظر گیری معیار نرخ فرونشست زمین در یازده حوزه آبریز داخلی ایران

مریم نعیمی^{۱*} | عادل جلیلی^۲ | رضا شهبازی^۳ | سمیرا زندی فر^۴ | سکینه لطفی نسب اصل^۵ | آزاده گوهر دوست^۶

۱. نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: naeimi@rifr-ac.ir
۲. استاد پژوهش، بخش تحقیقات گیاه‌شناسی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: jalili@rifr-ac.ir
۳. مدیرکل دفتر مخاطرات زیست‌محیطی و مهندسی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران. رایانامه: r_sh78@yahoo.com
۴. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: zandifar@rifr-ac.ir
۵. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: lotfinasab@rifr-ac.ir
۶. محقق، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: azade.gohardoust@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

کلیدواژه:

تخریب سرزمین،

فرونشست زمین،

مدل IMDPA،

منابع آب زیرزمینی.

تخریب سرزمین یک فرایند طبیعی یا فعالیت‌های انسان است که بر عملکرد زمین در یک اکوسیستم تأثیر منفی می‌گذارد. بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق یادشده می‌تواند به فرونشست زمین منجر شود. هدف مطالعه حاضر بررسی میزان تأثیر فرونشست زمین در تخریب سرزمین در یازده حوزه آبریز ایران با استفاده از مدل اصلی^۱ IMDPA و مدل توسعه‌یافته به نام^۲ IMDPAS است. بدین منظور ابتدا با استفاده از تصاویر فرونشست زمین برای اولین بار طبقه‌بندی این معیار صورت گرفت. سپس، لایه اطلاعاتی پارامترهای کمی و کیفی آب زیرزمینی شامل افت سطح آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، و نسبت جذب سدیم طبقه‌بندی شد و در نهایت با میانگین هندسی و تلفیق نقشه نهایی شدت تخریب سرزمین با استفاده از کلاس‌های خطر نهایی تهیه و مقایسه شد. مقایسه نتایج کلاس‌های شدت تخریب سرزمین محاسبه‌شده نشان داد درصد تغییرات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با استفاده از مدل توسعه‌یافته منجر به افزایش ۴۲ درصدی کلاس شدت تخریب سرزمین می‌شود که ۳۷ درصد آن در کلاس افزایشی متوسط به شدید است. این موضوع حاکی از اهمیت معیار نرخ فرونشست و طبقه‌بندی آن است. در نهایت، در ارتباط با مدل مورد بررسی، با توجه به عدم وجود مرجع رفرنس‌دهی برای معیار نرخ فرونشست، پیشنهاد می‌شود با ادامه پایش طبقه‌بندی نهایی برای کل ایران تکمیل شود.

استناد: نعیمی، مریم؛ جلیلی، عادل؛ شهبازی، رضا؛ زندی فر، سمیرا؛ لطفی نسب اصل، سکینه و گوهر دوست، آزاده (۱۴۰۳). ارزیابی عددی تخریب سرزمین با در نظر گیری معیار نرخ فرونشست زمین در یازده حوزه آبریز داخلی ایران. *آمایش سرزمین*، ۱۶ (۳) ۳۶۳-۳۸۲. DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>

© نویسندگان. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.386471.670485>



بیان مسئله

تخریب سرزمین در مناطق خشک، نیمه خشک، و خشک نیمه مرطوب ناشی از گسترش بیابان‌زایی است (UNCCD¹, 1994: 144) و امروز آثار زیان‌بار آن (Radda et al., 2019: 436) بیش از میلیاردها نفر از ساکنان در ۷۱ کشور را با معضل بزرگ اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی (Silakhori, 2015: 59)، امنیت غذایی، و رفاه تحت تأثیر قرار داده است (Shao et al., 2020: 511; Jiang et al., 2019: 13). تخریب سرزمین به واسطه مجموعه‌ای از عوامل مستقیم از جمله برداشت بیش از حد از منابع آب به خصوص آب زیرزمینی، تغییر کاربری اراضی، تغییرات پوشش اراضی، تغییرات آب‌وهوایی، و عوامل غیر مستقیم مانند افزایش جمعیت، شرایط اقتصادی-اجتماعی، اکولوژیکی-اجتماعی، تعاملات بین انسان و طبیعت، سیاست مدیریت زمین، و غیره رخ می‌دهد و از نظر زمان و مکان می‌تواند شدت متفاوتی داشته باشد (Riva et al., 2017: 10; Okpara et al., 2018: 61; Gichenje et al., 2019: 12).

از سوی دیگر، ادامه خشک‌سالی‌های اقلیمی و دخالت‌های انسانی همچون بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی، دریایی کم‌عمق، یا دریاچه‌ای تحکیم‌نیافته انباشته شده‌اند (یمانی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۰) به‌آهستگی و به تدریج منجر به کاهش درصد رطوبت خاک و تراکم لایه‌های زیرین می‌شود و در پی آن فروروشست زمین رخ خواهد داد. فروروشست منجر به تغییرات برگشت‌ناپذیر در اکوسیستم‌های حساس همانند مناطق خشک و بیابانی می‌شود که از آن جمله می‌توان به افزایش فرسایش خاک (Ma et al., 2019: 31) و به تبع آن افزایش گرد و غبار (Machoswski et al., 2016: 1742)، کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی ناشی از افت تراز آب‌های زیرزمینی، و کاهش کیفیت خاک (افزایش شوری و سدیمی شدن خاک) اشاره کرد. بر این اساس، پدیده فروروشست موجب تخریب سرزمین و گسترش بیابان‌زایی می‌شود. در طول سی سال اخیر حداقل ۱۵ متر از عمق سفره‌های آب زیرزمینی در ایران کاسته شده است و به طور متوسط در هر سال نیم متر سطح آبخوان در کشور پایین رفته است (روستایی و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۹). در این شرایط، ارزیابی علمی، قابل تکرار، سیستماتیک، و به طور واضح ارزیابی کمی تخریب سرزمین در ایران امری ضروری است. زیرا وقوع این مسئله بر امنیت غذایی، برنامه‌های کمک‌های بین‌المللی، توسعه ملی اقتصادی، و راهبردهای حفاظت از محیط زیست اثر می‌گذارد (مسعودی و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۱۴).

هرچند مرور مطالعات نرخ فروروشست زمین نشان می‌دهد این پدیده به عنوان نمادی از تخریب سرزمین در حال گسترش است، هنوز فروروشست زمین به عنوان یک معیار یا شاخص در مدل‌های ارزیابی تخریب سرزمین بالاخص در اکوسیستم‌های شکننده که با همراهی سایر معیارها سرعت گسترش چندین برابر را تجربه می‌کنند به کار گرفته نشده است. پژوهش حاضر، برای نخستین بار سعی در ارزیابی علمی و عددی و امکان‌سنجی ورود نرخ فروروشست زمین به عنوان یک معیار جدید جهت تعیین شدت تخریب سرزمین در یازده حوزه آبریز داخلی ایران دارد.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

تخریب سرزمین مشتمل بر کاهش مداوم ظرفیت تولید سرزمین است که خود را به صورت مختلف همچون فرسایش خاک، زوال مواد مغذی خاک، از دست رفتن تنوع زیستی، جنگل‌زدایی، و کاهش سلامت گیاهی یا اضمحلال آن نشان می‌دهد (Zou & Yoshino, 2017: 406). از سوی دیگر، ارتباط بین پدیده تخریب سرزمین و فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی رابطه‌ای متقابل و در عین حال چندلایه و پیچیده است (Abdelkavy & Darvish, 2019: 14). بنابراین نظارت، پایش، و ارزیابی میزان تخریب سرزمین از دید محیط زیستی مسئله‌ای حائز اهمیت است که نیاز به شناخت روند پویای تخریب و در ادامه ارائه راه‌حل‌های پیشگیرانه علمی و حفاظت‌های محیط زیستی به منظور احیای آن دارد (Sun et al., 2019: 221).

به منظور پایش و ارزیابی تخریب سرزمین، روش‌های متنوع اندازه‌گیری‌های میدانی و سنجش از دور ارائه شده است. برخی از محققان پیمایش، سنجش، و نمونه‌برداری محیطی همراه رویکردهایی همچون بهره‌مندی از نظرات کارشناس‌ها و کاربران اراضی و

1. The United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD)

ذی‌نفعان و بررسی تغییرات بهره‌وری اراضی در سطوح مختلف ملی و محلی را از اصلی‌ترین رویکردها می‌دانند (Van Lynden & Kuhlmann, 2002: 18). این در حالی است که از دید متخصصان سنجش از دور ابزارهای معرفی شده از طریق تصاویر ماهواره‌ای و راداری همراه با ابزار سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌سادگی اهداف را قابل دستیابی می‌کند. با وجود این، استفاده از این ابزارها در کنار نقاط قوت محدودیت‌هایی نیز دارد (Nkonya et al., 2011: 15; Tiwari & Mishra, 2022: 3).

بر این اساس، مدل‌های متنوعی با توجه به شاخص‌ها و معیارهای گسترده‌ای با در نظرگیری مقیاس، منطقه، و عوامل خاص به منظور تعیین کمی و کیفی شدت تخریب سرزمین معرفی شده که در داخل و خارج از کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ که طبیعتاً در مقام مقایسه دارای مزایا و محدودیت‌هایی نسبت به هم هستند. مرور منابع نشان داد مدل‌های فائو-یونپ^۱ (فتاحی و همکاران، ۱۳۸۹: ۵۹۳)، گالسود^۲ (حاجی‌ملکی و همکاران، ۱۳۹۴: ۸۵۰)، مدالوس^۳ (Luckic et al., 2022: 163)، لادا^۴ (Nikpour et al., 2022: 20)، مدل طبقه‌بندی نوع و شدت بیابان‌زایی ایرانی^۵ (توکلی و همکاران، ۱۳۹۶: ۸۶۷)، مدل طبقه‌بندی بسط یافته بیابان‌زایی ایرانی^۶ (اونق و همکاران، ۱۴۰۱: ۲۲)، و مدل ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی ایرانی^۷ (کرامت‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۵۷) برای ارزیابی و تهیه نقشه بیابان‌زایی و تخریب سرزمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی مطالعات داخلی و خارجی نشان داد برای ارزیابی بیابان‌زایی مدل مدالوس و مدل IMDPA به عنوان نسخه اصلاح شده مدالوس برای ایران راه و روشی قابل اعتماد و مورد پذیرش جامعه علمی داخل و خارج کشور است (اختصاصی و سپر، ۱۳۹۰: ۱۴؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۵). مدل IMDPA که توسط سازمان منابع طبیعی کشور در سال ۱۳۸۴ ارائه شد (زهتابیان و همکاران، ۱۳۸۶: ۷۲۴) با عنایت به تجربیات و نظرات کارشناسی شامل ۹ معیار و ۳۶ شاخص است. در این مدل، وضعیت تخریب سرزمین در چهار گروه آب‌وهوا شامل معیارهای اقلیم و آب آبیاری، گروه زمین با معیارهای زمین و ژئومورفولوژی، خاک و فرسایش، گروه پوشش زمین متشکل از معیارهای پوشش گیاهی و کشاورزی، و گروه اثر انسانی شامل معیارهای اقتصادی-اجتماعی و توسعه شهری-صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرد (رایگانی و همکاران، ۱۳۹۲: ۷۵؛ زهتابیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۵). مطالعات گسترده‌ای بر مبنای این مدل و با در نظرگیری برخی از معیارها همچون آب زیرزمینی (برزگر و مسعودی، ۱۳۹۸: ۵۴)، اقلیم، خاک، پوشش گیاهی، و فرسایش بادی (خانی‌بندانی و جعفری، ۱۳۹۸: ۱۰۲)، آب، اقلیم، پوشش گیاهی، و خاک (پهنیا و همکاران، ۱۴۰۰: ۸۳)، اقلیم، کیفیت خاک، کاربری اراضی، میزان پوشش گیاهی، و کاربری اراضی (Uzuner & Dengiz, 2020: 301)، اقلیم، خاک، پوشش گیاهی، مدیریت، آب، ژئومورفولوژی، و انسانی (vvvveeeet al., 2020: 111) صورت گرفته است. همچنین، مطالعاتی در ارتباط با ارزیابی شدت تخریب سرزمین با استفاده از مدل IMDPA و گالسود انجام شده که نتایج حاصل از برآورد صحت کلی، ضریب کاپای نقشه‌های نهایی، و همبستگی غیرپارامتریک برتری مدل ایرانی و همخوانی بیشتر و نزدیک‌تر به واقعیت را نشان داد (انتظاری زارچ و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۸).

تمرکز بر معیار آب، مرور منابع، و واقعیت میدانی نشان می‌دهد در اثر بهره‌برداری بی‌رویه انسان، افت سطح سفره‌های زیرزمینی، اختلاط آب شور و شیرین (جمور و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۲۴) تخریب خاک به واسطه استفاده از آب کشاورزی شور در سال‌های اخیر رو به فزونی بوده که نشانگر نقش و جایگاه این منبع مهم در تخریب سرزمین است. همچنین، مطالعاتی در ارتباط با تعیین نرخ فرونشست زمین در داخل کشور همچون دشت مشگین (نظم‌فر و شیرزاد، ۱۴۰۱: ۴۵)، غرب استان گلستان (تورانی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۲۴)، میناب در استان هرمزگان (جمور و همکاران، ۱۳۹۷: ۲۳۵)، شهر مشهد (صالحی‌متعهد و همکاران، ۱۳۹۸: ۴۶۰)، کرج (رنجبر و فتح‌الله‌زاده، ۱۴۰۱: ۱۴) و در خارج از کشور همچون مکزیک (Cigna & Tapete, 2021: 4)، آریزونا آمریکا (Peng et al., 2022: 114)، و تایوان (Tang et al., 2022: 212) با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری انجام شده است.

1. The United Nations Environment Programme- The Food and Agriculture Organization (UNEP-FAO)
2. The Global Assessment of Soil Degradation (GIASOD)
3. The Mediterranean desertification and land use (MEDALUS)
4. Land Degradation Assessment in Drylands (LADA)
5. Iranian Classification of Desertification (ICD)
6. Modified Classification of Desertification (MICD)
7. Iranian Model of Desertification Potential Assessment (IMDPA)

محدوده و قلمرو مورد مطالعه

برای انجام دادن مطالعات منابع آب در مقیاس ملی کل کشور به ۶ حوضه آبخیز درجه یک، ۳۰ حوضه آبخیز درجه دو، و ۶۳۶ محدوده مطالعاتی تقسیم شده است. مطالعات با داده‌های مورد نیاز در یازده حوضه آبریز فلات مرکزی ایران انجام شد. در شکل ۱ موقعیت حوضه‌های آبریز مورد مطالعه و موقعیت محدوده‌های مطالعاتی آن نشان داده شده است.

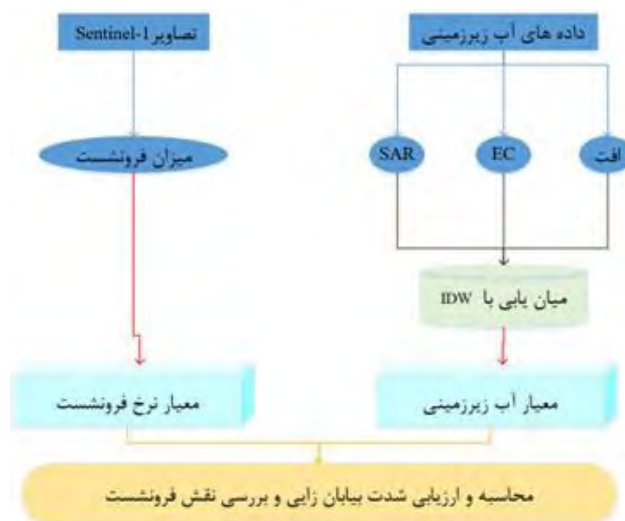


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی یازده حوضه آبریز داخلی در کشور ایران

روش و ابزار تحقیق

ابتدا، تهیه و ارائه نقشه محدوده‌های دارای فرونشست به همراه بررسی نرخ و جزئیات آن مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی فرونشست از روش تداخل‌سنجی راداری استفاده شد. در این روش، با مقایسه فازهای دو تصویر راداری از یک منطقه در دو زمان مختلف امکان بررسی تغییرات سطح زمین در بازه زمانی مورد نظر قابل محاسبه می‌شود. بدین منظور، پس از دانلود تصاویر محدوده‌های واقع در یازده حوضه آبریز داخلی ایران با استفاده از سایت eu.copernicus.scihub و سپس ورود آن‌ها در نرم‌افزار ENVI ۵.۱ پردازش انجام می‌شود (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۲: ۷۷۳). در این تحقیق به منظور محاسبه فرونشست از تصاویر سنتینل رادار با فرمت SLC تک‌منظر با پوراریزاسیون (VV) جهت محاسبه میزان نرخ جابه‌جایی استفاده شد. روش تداخل‌سنجی راداری روشی برای ترکیب تصاویر SAR گرفته‌شده از سنجنده‌های راداری نصب‌شده بر هواپیما به منظور تهیه نقشه‌های ارتفاعی، جابه‌جایی، و تغییرات سطح زمین، نیز تعیین سرعت حرکت هدف است (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۲: ۷۷۳). دو تصویر SAR پیش و پس از ایجاد جابه‌جایی از سطح زمین گرفته می‌شود و هر گونه جابه‌جایی در سطح زمین سبب تغییر در فاصله سنجنده می‌شود.

در پژوهش حاضر دو تصویر Sentinel A ۱- از نوع SLC در بازه زمانی ۲۰۲۰/۰۸ تا ۲۰۲۰/۱۲ از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی گرفته شد. پس از اخذ تصاویر با فرمت Geotiff ابتدا همه تصاویر فرونشست در حوضه‌های مورد مطالعه یکپارچه و سپس موزاییک شدند. در ادامه دیتا بیس مرتبط با تصاویر ساخته و در یازده حوضه آبریز تقسیم شد. در پروژه ملی با استفاده از تصویر موزاییک‌شده داده‌های فرونشست کلی اخذ و سعی در بهترین برازش با بالاترین ضریب تعیین جهت کلاسه‌بندی شد.



شکل ۲. و شماتیک کلی روش تحقیق این پژوهش

همچنین، داده‌های تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵ نیز به منظور تهیه پهنه‌بندی میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت‌های مورد مطالعه از وزارت نیرو اخذ شد. در ارتباط با داده‌های کیفیت آب با توجه به نبود داده‌های کافی در سال ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵ در همه محدوده‌های مطالعاتی ناچار داده‌های دوره آماری ۱۳۹۳ - ۱۳۹۷ جهت مطالعات کیفی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج اولیه بررسی داده‌های کمی و کیفی نشان می‌دهد در مجموع به ترتیب ۴۷۳۸ و ۵۲۸۶ داده چاه در کل حوضه‌های مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفته است. گفتنی است به دلیل عدم پوشش یکپارچه داده‌های کمی در سطح حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه در ماه و سال یادشده از سایر ماه‌ها همچون آبان یا آذر استفاده شد. شکل ۲، شماتیک کلی روش تحقیق در این پژوهش را نشان می‌دهد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

تهیه نقشه شدت بیابان‌زایی

برای ارزیابی شدت تخریب سرزمین از مدل پایه IMDPA استفاده شد. بدین منظور، با توجه به هدف مطالعه و همچنین آمار و اطلاعات در دسترس معیارهای آب زیرزمینی و نرخ فرونشست انتخاب شدند. گفتنی است در این پژوهش برای اولین بار معیار فرونشست به عنوان عامل مؤثر در محاسبه شدت تخریب سرزمین با استفاده از مدل یادشده در نظر گرفته شد. بر این اساس، کلاسه‌بندی معیار نرخ فرونشست برای نخستین بار با داده‌های موجود انجام گرفت و با افزودن معیار نرخ فرونشست نام مدل به IMDPAS تغییر داده شد. شکل ۱ شماتیک کلی روش تحقیق این پژوهش شامل معیارها و شاخص‌های انتخابی مؤثر در بیابان‌زایی محدوده‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد.

جهت بررسی معیار آب زیرزمینی از سه شاخص افت آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی (EC)، و نسبت جذبی سدیم (SAR) استفاده شد. داده‌های این شاخص با استفاده از چاه‌های پیژومتری و مشاهداتی به دست آمد. جهت محاسبه افت متوسط تغییرات سالیانه عمق سطح آب پیژومترها محاسبه شد. نسبت جذبی سدیم از غلظت کاتیون سدیم به ریشه دوم مجموع غلظت کاتیون‌های کلسیم و منیزیم (رابطه ۱) محاسبه می‌شود. این شاخص ساده‌ترین روش برای ارزیابی خطر غلظت بالای سدیم در محلول آب است.

$$\text{SAR} = \frac{[\text{Na}]}{([\text{Ca}]^{+2} + [\text{Mg}]^{+2})/2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

جدول ۱. شاخص‌های ارزیابی معیار آب زیرزمینی و نرخ فروروشست زمین مؤثر بر شدت بیابان‌زایی در مدل اصلی و توسعه‌یافته

شاخص ارزیابی	کم	متوسط	شدید	خیلی شدید
افت آب زیرزمینی	20 >	30-20	50-30	50 <
نسبت جذب سدیم (SAR)	18 >	26-18	32-26	32 <
هدایت الکتریکی (EC)	750 >	2250-750	5000-2250	5000 <
(میکروموس بر سانتی‌متر)				
نرخ فروروشست (سانتی‌متر در سال)	> -1.49	-1.5 - -2.99	-3 - -5.99	< -6

در ادامه، با استفاده از جدول ۱، نقشه مقادیر نرخ فروروشست زمین و امتیاز شدت بیابان‌زایی هر محدوده نیز تعیین و نقشه شدت تخریب سرزمین بر اساس این شاخص تهیه شد. پس از محاسبه نقشه شدت دو معیار که نشان‌دهنده کیفیت هر معیار و تأثیر آن‌ها در بیابان‌زایی است، نقشه نهایی وضعیت بیابان‌زایی از میانگین هندسی معیارهای یادشده بر اساس رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\text{رابطه ۲} \quad (DM = \sqrt[1/2]{(GWI \times SRI)})$$

که در آن GWI معیار آب زیرزمینی، SRI معیار نرخ فروروشست، و DM نقشه وضعیت فعلی بیابان‌زایی است. جدول ۲ کلاس‌ها و وزن‌های اخذشده برای ارزیابی وضعیت معیارها در مدل IMDPAS را نشان می‌دهد. گفتنی است جهت بررسی شدت تخریب سرزمین در پروژه حاضر با استفاده از معیار آب و نرخ فروروشست زمین امتیازدهی به این معیارها در منطقه مورد مطالعه بر اساس دو مدل IMDPA و مدل توسعه‌یافته IMDPAS و داده‌های در دسترس انجام شد.

جدول ۲. طبقات کلاس‌های شدت بیابان‌زایی در مدل اصلی و توسعه‌یافته

ردیف	کلاس شدت بیابان‌زایی	دامنه امتیاز در مدل IMDPAS	دامنه امتیاز در مدل IMDPA
۱	کم	۰ - ۰/۹۹	۰ - ۱/۴۹
۲	متوسط	۱ - ۱/۹۹	۱/۵ - ۲/۴۹
۳	شدید	۲ - ۲/۹۹	۲/۵ - ۳/۴۹
۴	بسیار شدید	۳ - ۴	۳/۵ - ۴

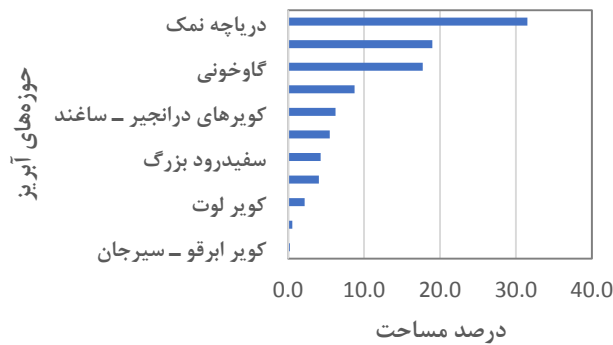
در ادامه، دو سناریو برای تعیین شدت تخریب سرزمین با استفاده از: ۱. مدل اصلی IMDPA و ۲. مدل توسعه‌یافته تعریف شد و شدت تخریب سرزمین با استفاده از معیار نرخ فروروشست زمین و آب زیرزمینی تعیین شد. گفتنی است با توجه به طبقه‌بندی مشخص (جدول ۲) در هر مدل مقایسه‌ای بین شدت تخریب سرزمین صورت گرفت.

یافته‌های پژوهش

ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی در هر یک از شاخص‌ها

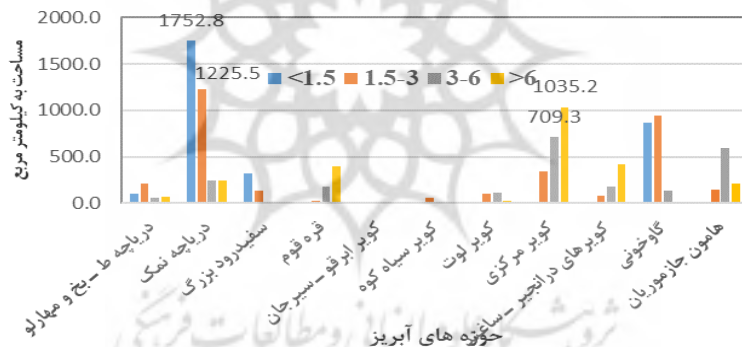
معیار فروروشست زمین

نتایج نشان داد تعداد ۱۸۷ محدوده از مجموع ۵۰۰ محدوده مطالعاتی برابر ۱۱۰۰۷/۵۶ هزار کیلومتر مربع در یازده حوضه آبریز مورد مطالعه درگیر فروروشست زمین است و امکان ارزیابی معیار نرخ فروروشست در آن‌ها وجود دارد. با توجه به شکل ۳ بیشینه نرخ فروروشست در حوضه‌های دریاچه نمک و سفیدرود به ترتیب معادل ۱۵/۵ و ۱۴/۵ سانتی‌متر است. این در حالی است که باقی حوضه‌ها شرایط بینابین را تجربه می‌کنند. حوضه‌های مهارلو، گاوخونی، و درانجیر حداکثر ۱۲/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. حوضه‌های کویر مرکزی، جازموریان، و ابرقو بیشینه ۹ سانتی‌متر را نشان می‌دهند. کویر لوت و سیاه‌کوه تا ۸ سانتی‌متر حداکثر فروروشست را نشان می‌دهند. نتایج در شکل ۴ نشان می‌دهد در مجموع منطقه مورد مطالعه ۷۸ درصد فروروشست در حوضه‌های دریاچه نمک، گاوخونی، کویر مرکزی، و جازموریان داشته که به ترتیب معادل ۳۲، ۱۹، ۱۸، و ۹ درصد است.

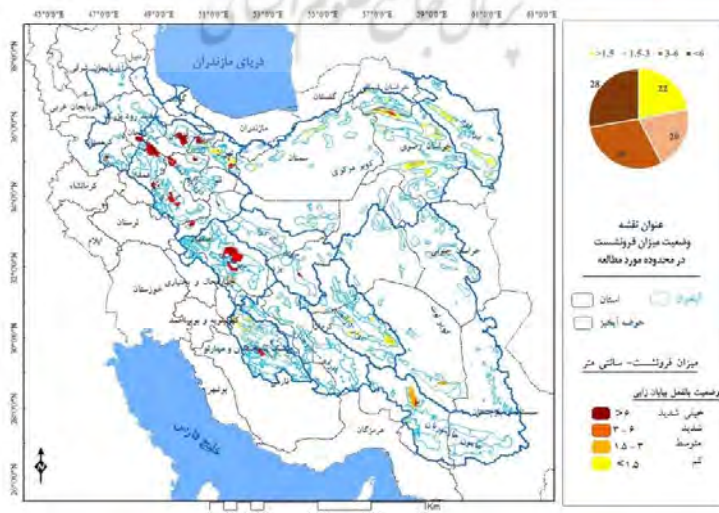


شکل ۳. درصد مساحت فرونشست در حوزه‌های آبریز مورد مطالعه مرتبط با داده‌های سال ۱۳۹۵ با تصاویر اخذشده از سازمان زمین‌شناسی کشور به تفکیک حوضه‌های آبریز مطالعاتی

پهنه‌بندی طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی با در نظرگیری نرخ فرونشست نیز نشان می‌دهد (شکل ۴) بیشترین مساحت کلاس شدید و بسیار شدید در حوزه کویر مرکزی معادل به ترتیب ۱۰۳۵ و ۷۰۹ کیلومتر مربع بوده است. همچنین، بیشترین مساحت‌های کلاس‌های کم و متوسط در حوزه دریاچه نمک معادل به ترتیب ۱۷۵۳ و ۱۲۲۶ کیلومتر مربع است. نکته قابل توجه در پراکندگی اراضی مواجهه با فرونشست و اراضی با بیشینه نرخ است. حوزه‌های دریاچه نمک و سفیدرود بیشینه نرخ فرونشست در سال ۱۳۹۵ را در خود داشته است؛ در حالی که بیشترین مساحت اراضی با کلاس بسیار شدید (<۶) در کویر مرکزی، درانجیر، و قره‌قوم است. تشخیص این اراضی جهت تعیین اولویت به منظور کنترل پیشرفت فرونشست قابل بررسی و تأمل است.



شکل ۴. مساحت کلاس‌های فرونشست در کل محدوده مطالعاتی به تفکیک حوضه‌های آبریز



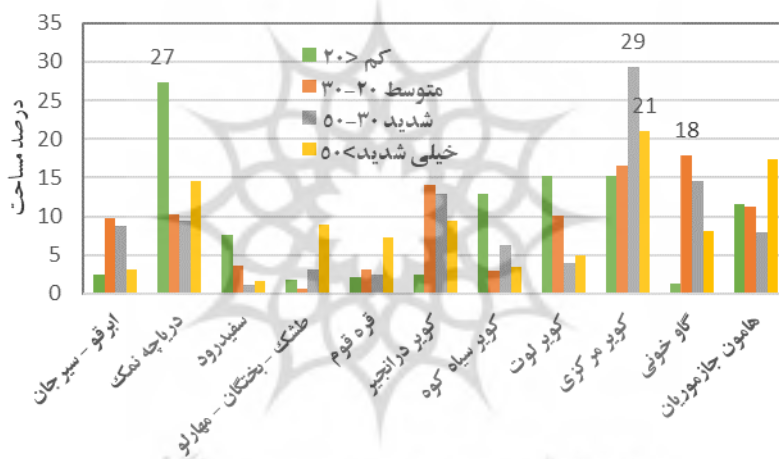
شکل ۵. الپهنه‌بندی شدت تخریب سرزمین، نرخ فرونشست در کل محدوده مطالعاتی به تفکیک حوضه‌های آبریز

معیار آب زیرزمینی

کمیت آب زیرزمینی

بررسی وضعیت بالفعل تخریب سرزمین با شاخص افت آب زیرزمینی در مهرماه سال آبی ۱۳۹۴ - ۱۳۹۵ که تصاویر فرونشست زمین نیز با آن متناسب است نتایج قابل قبول تری ارائه داد (شکل ۶). با توجه به نتایج ۴۳ محدوده در مجموعه حوضه‌های آبریز مورد مطالعه در کلاس بالاتر از ۵۰ سانتی‌متر در سال قرار دارند. همچنین، نتایج در طبقات بعدی شامل < 20 و $30-50$ سانتی‌متر در سال معادل به ترتیب ۱۹ و ۳۰ درصد قرار گرفت. در نهایت کمترین میزان افت آب معادل ۸ درصد در کلاس $20-30$ سانتی‌متر در سال است. افزون بر این، بالاترین و پایین‌ترین محدوده‌ها در کلاس بسیار شدید کویر مرکزی و کویر سیاه‌کوه است.

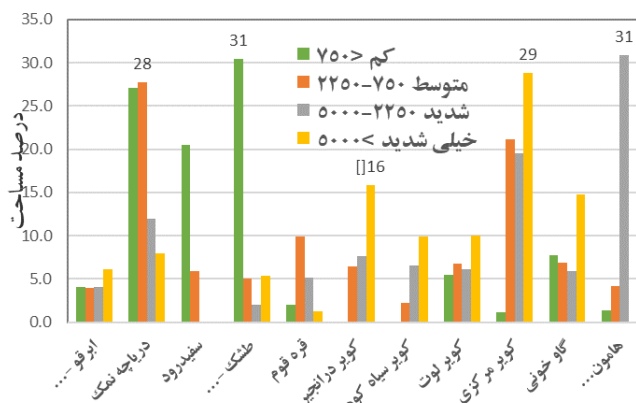
با توجه به نتایج در شکل ۶، ۵۳ درصد از کل حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه در کلاس افت آب زیرزمینی بالاتر از ۵۰ سانتی‌متر در سال قرار دارند. همچنین، از مجموع ۱۳۲ هزار کیلومتر مربع از مساحت بررسی افت آب زیرزمینی ۳ حوزه کویر مرکزی (۲۱)، دریاچه نمک (۱۶)، و جازموریان (۱۴) بالاترین درصد مساحت‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. در ادامه، درصد مساحت طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی از منظر شاخص افت آب زیرزمینی نشان می‌دهد که بالاترین درصد طبقات شدید و خیلی شدید در کویر مرکزی معادل به ترتیب ۲۹ و ۲۱ درصد است. در طبقات کم و متوسط به ترتیب دریاچه نمک و گاوخونی معادل ۲۷ درصد از مجموع مساحت را به خود اختصاص می‌دهند.



شکل ۶. مساحت کلاس‌های شدت تخریب سرزمین از منظر افت آب زیرزمینی در حوزه‌های آبریز مورد مطالعه

شاخص هدایت الکتریکی

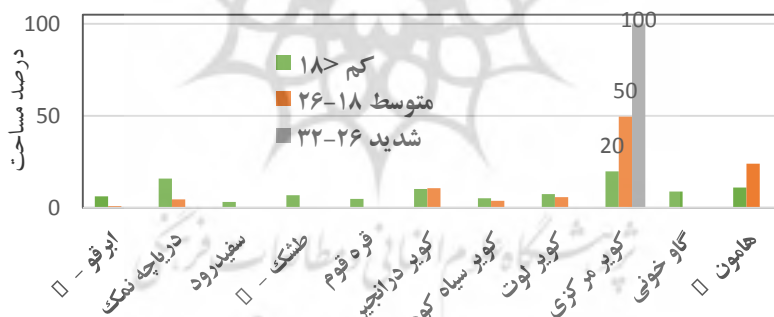
بررسی طبقات شدت تخریب سرزمین حوضه آبریزهای مورد مطالعه از منظر شاخص هدایت الکتریکی نشان می‌دهد در اکثر نواحی حوضه‌های آبریز مورد مطالعه تخریب در کلاس‌های شدید و خیلی شدید قرار دارد. با وجود این، در بخش‌هایی از نواحی شمالی و شمال غربی شرایط در حالت متوسط و حتی کلاس شدت کم نیز قابل مشاهده است. در ادامه نتایج حاکی از آن است که در کل محدوده مطالعاتی ۸، ۲۹، ۴۶، و ۳۲ درصد به ترتیب در کلاس کم تا بسیار شدید قرار دارند. همچنین، در کلاس بسیار شدید کویر مرکزی و کویر لوت بیش‌تاز سایرین هستند. از مجموع ۱۱۵ هزار کیلومتر مربع از مساحت بررسی هدایت الکتریکی ۴ حوزه کویر مرکزی (۲۴)، دریاچه نمک (۱۸)، درانجیر (۱۰)، و گاوخونی (۱۰) بالاترین درصد مساحت‌ها را به خود اختصاص می‌دهند. در ادامه، درصد مساحت طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی از منظر شاخص هدایت الکتریکی به تفکیک حوضه‌های آبخیز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در کلاس بسیار شدید کویر مرکزی (۲۹٪) و کویر درانجیر (۱۶٪) بیش‌تاز سایرین‌اند. در حالی که در کلاس کم، متوسط، و شدید به ترتیب بیشترین مساحت در مهارلو (۳۱٪)، دریاچه نمک (۲۸٪)، و جازموریان (۳۱٪) است.



شکل ۷. درصد مساحت طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی از منظر هدایت الکتریکی به تفکیک حوضه‌های آبخیز

نتایج شاخص نسبت جذبی سدیم

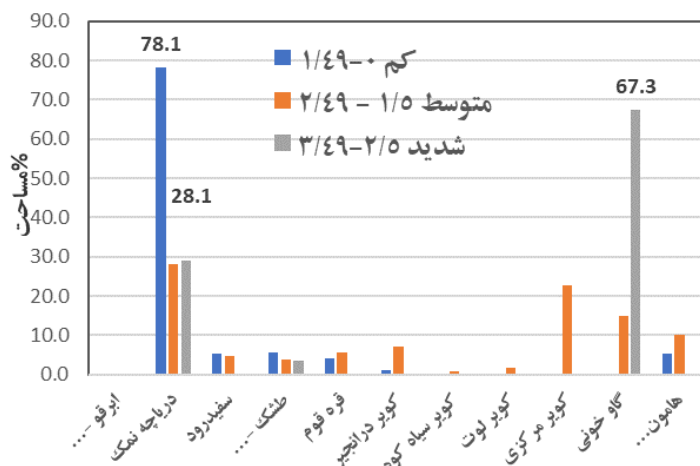
بررسی طبقات شدت تخریب سرزمین حوضه‌های آبریز مورد مطالعه از منظر شاخص نسبت جذبی سدیم نشان می‌دهد ۹۰ درصد از کل محدوده مطالعاتی در کلاس کم، ۸/۵ درصد در کلاس متوسط، ۰/۵۶ درصد در کلاس شدید، و تنها دو محدوده در حوضه کویر مرکزی ایران در کلاس بسیار شدید مساوی قرار دارند. همچنین ۹۳ درصد از کل محدوده مطالعاتی در کلاس کم، ۷ درصد در کلاس متوسط، ۰/۵۶ درصد در کلاس شدید قرار دارند. نیز، از مجموع ۱۳۰ هزار کیلومتر مربع از مساحت بررسی شاخص نسبت جذب سدیم ۳ حوضه کویر مرکزی (۲۹)، دریاچه نمک (۲۰)، و جازموریان (۱۵) بالاترین درصد مساحت‌ها را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ۸). ۱۰۰ درصد کلاس شدید در حوضه کویر مرکزی دیده شده است. همچنین در کلاس‌های کم و متوسط نیز کویر مرکزی پیشرو است.



شکل ۸. درصد مساحت طبقات مختلف شدت تخریب سرزمین از منظر نسبت جذبی سدیم به تفکیک حوضه‌های آبخیز

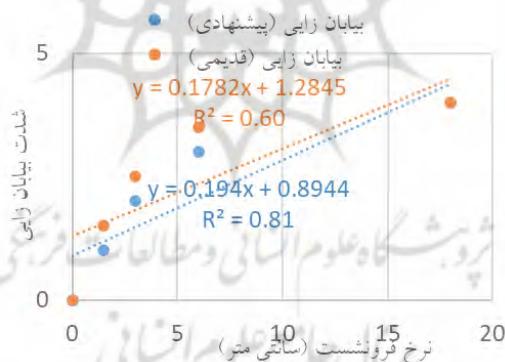
ارزیابی تخریب سرزمین با تلفیق معیار فرونشست زمین و منابع آب زیرزمینی با مدل اصلی و توسعه یافته

با توجه به شکل ۹، ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین نشان می‌دهد در کل حوضه‌های مورد مطالعه شدت تخریب سرزمین در کلاس‌های کم، متوسط، و شدید قرار می‌گیرد. بر این اساس، کلاس خیلی شدید در شرایط بالفعل تخریب سرزمین در سناریوی اول با داده‌های سال ۱۳۹۵ وجود ندارد. در ادامه بررسی جزئی‌تر طبقات شدت تخریب سرزمین نشان می‌دهد ۹ درصد از کل محدوده مطالعاتی در کلاس کم، ۸۲ درصد در کلاس متوسط، و ۹ درصد در کلاس شدید قرار دارند. در ادامه نتایج نشان‌دهنده درصد مساحت طبقات مختلف شدت بیابان‌زایی از منظر معیارهای نرخ فرونشست و آب زیرزمینی به تفکیک حوضه‌های آبخیز است که بیشترین مساحت کلاس کم و متوسط در حوضه دریاچه نمک معادل به ترتیب ۷۳۹ و ۲۴۰۱ کیلومتر مربع است. این در حالی است که بیشترین مساحت کلاس شدید در حوضه گاوخونی ۶۵۴ کیلومتر مربع است. بر این اساس، حوضه گاوخونی از منظر آب زیرزمینی و نرخ فرونشست دارای بیشترین مساحت کلاس‌های شدید شدت تخریب سرزمین است.



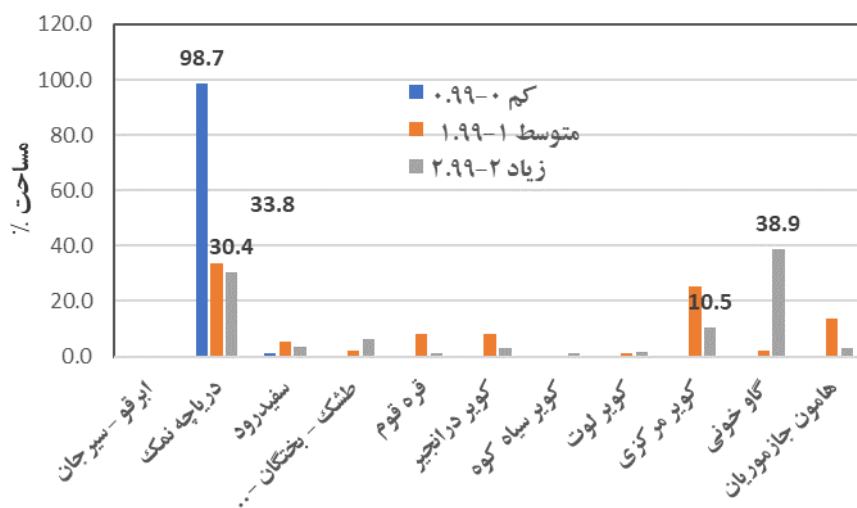
شکل ۹. مساحت (درصد) طبقات مختلف شدت تخریب سرزمین از منظر معیارهای نرخ فرونشست و آب زیرزمینی به تفکیک حوضه‌های آبخیز با استفاده از مدل IMDPA

با توجه به نتایج به دست آمده از سناریوی ۱ و نظر به قرارگیری ۸۲ درصد از کل یازده حوزه آبریز در کلاس متوسط با طبقه‌بندی مدل اصلی، در ادامه، با بررسی عددی ضریب تبیین و ارتباط نرخ فرونشست با شدت تخریب سرزمین، با استفاده از روش نمره‌دهی مدل اصلی IMDPA و توسعه یافته با نام IMDPAS با ضریب تبیین ۰/۸ (شکل ۱۰)، بررسی جزئی‌تر شدت تخریب سرزمین با استفاده از سناریوی ۲ ارائه می‌شود. در سناریوی ۲ تهیه نقشه شدت تخریب سرزمین از منظر معیار آب زیرزمینی و فرونشست زمین با امتیازدهی بر اساس مدل توسعه یافته با نام IMDPAS صورت پذیرفت که تفاوت‌های طبقه‌بندی کمی شدت تخریب بر اساس این دو مدل در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. ارتباط نرخ فرونشست با شدت تخریب سرزمین با استفاده از روش نمره‌دهی پیشنهادی مدل اصلی و IMDPAS

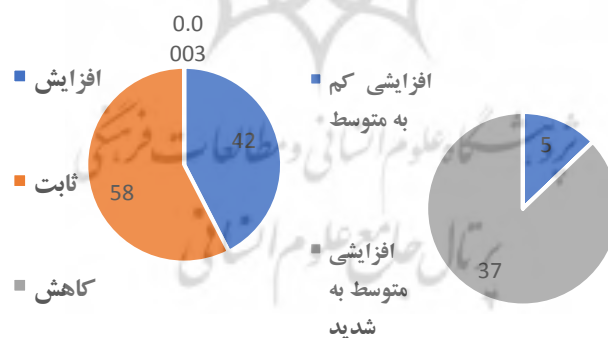
با توجه به شکل ۱۱، ارزیابی وضعیت تخریب سرزمین نشان می‌دهد در کل حوضه‌های مورد مطالعه شدت تخریب سرزمین در کلاس‌های کم، متوسط، و شدید قرار می‌گیرد. بر این اساس، کلاس خیلی شدید در شرایط بالفعل تخریب سرزمین در سناریوی ۳ همانند سناریوی ۲ با داده‌های سال ۱۳۹۵ وجود ندارد. همچنین، ۵۴ درصد از کل محدوده مطالعاتی در کلاس متوسط، ۱ درصد در کلاس کم، و ۴۵ درصد در کلاس شدید قرار دارند. با توجه به نتایج تنها محدوده دارای کلاس کم در بخشی از محدوده تهران-کرج در حوضه دریاچه نمک معادل ۶۴ کیلومتر مربع است. بیشترین مساحت متعلق به کلاس متوسط است که در دریاچه نمک معادل ۱۹۲۸ کیلومتر مربع است. این در حالی است که بیشترین مساحت کلاس شدید در حوضه گاوخونی ۱۸۱۴ کیلومتر مربع است. بر این اساس، حوضه گاوخونی از منظر آب زیرزمینی و نرخ فرونشست دارای بیشترین مساحت کلاس‌های شدید شدت تخریب سرزمین است.



شکل ۱۱. طبقات شدت تخریب سرزمین در همه حوضه‌های آبخیز از منظر معیارهای نرخ فرورنشست و آب زیرزمینی با استفاده از طبقه‌بندی مدل IMDPAS (سناریوی ۲)

بحث

در ادامه به بررسی پتانسیل و شدت تخریب سرزمین با استفاده از دو مدل IMDPA اصلی و توسعه‌یافته در پژوهش حاضر، با در نظرگیری معیارهای نرخ فرورنشست زمین و آب زیرزمینی (شاخص‌های هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم، افت تراز)، پرداخته شد. مقایسه نتایج کلاس‌های محاسبه‌شده در مناطق دارای فرورنشست با استفاده از دو مدل مشتمل بر مدل اصلی IMDPA و توسعه‌یافته IMDPAS (سناریوی ۱ و ۲) صورت گرفت. با توجه به شکل ۱۲، درصد تغییرات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با استفاده از مدل توسعه‌یافته منجر به افزایش ۴۲ درصدی کلاس شدت تخریب شده است. همچنین ۵۸ درصد مناطق در کلاس یکسان باقی مانده‌اند؛ در حالی که کمتر از یک‌هزارم درصد نیز کاهش کلاس داشته‌اند.

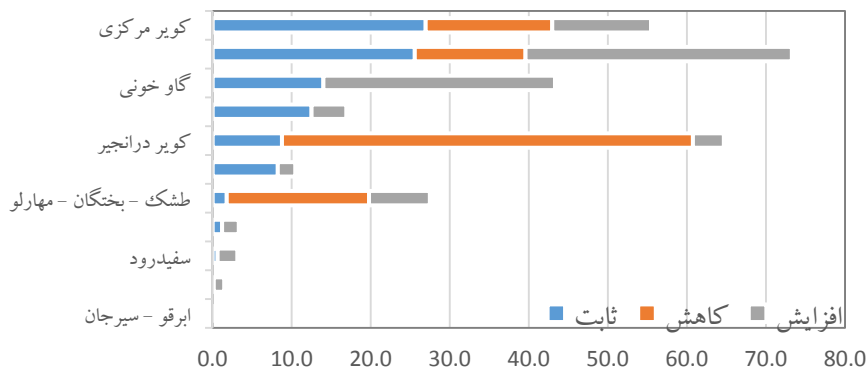


شکل ۱۲. درصد مساحت تغییر کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در مناطق دارای فرورنشست با استفاده از مدل اصلی و توسعه‌یافته، درصد مساحت جزئیات تغییر کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در مناطق دارای فرورنشست با استفاده از مدل اصلی و توسعه‌یافته

در ادامه با بررسی جزئی‌تر تغییرات کلاس‌ها (بدون در نظرگیری کلاس ثابت) روشن شد بیشترین درصد مساحت تغییر در کلاس افزایشی متوسط به شدید و افزایشی کم به متوسط معادل به ترتیب ۳۷ و ۵ درصد است.

همچنین، شکل ۱۳ نشان می‌دهد بیشترین تغییرات افزایشی در دریاچه نمک، گاوخونی، و کویر مرکزی معادل ۳۴، ۲۹، و ۱۳ درصد است. به عبارت دیگر ۳۴ درصد از مناطق دارای فرورنشست در حوزه دریاچه نمک با استفاده از مدل توسعه‌یافته دارای افزایش شدت تخریب سرزمین شدند. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت و ضرورت تغییر کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با توجه به تخریب‌های پیاپی زیست‌محیطی به خصوص در منابع آب‌های زیرزمینی به واسطه برداشت‌های بی‌رویه است. کمترین

مساحت تغییرات افزایشی در ابرقوی سیرجان معادل ۰/۴ درصد است. حوزه‌های سفیدرود، قره‌قوم، و لوت معادل ۲ درصد مساحت تغییرات افزایشی داشته‌اند. کاهش کلاس شدت تخریب سرزمین تنها در حوزه‌های کویر درانجیر، مهارلو، کویر مرکزی، و دریاچه نمک قابل گزارش است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. مقایسه درصد مساحت تغییر کلاس‌های شدت تخریب سرزمین در مناطق دارای فرونشست با استفاده از مدل اصلی و توسعه یافته به تفکیک حوزه‌های آبریز

همچنین، حوزه‌های کویر مرکزی، دریاچه نمک، گاوخونی، و جازموریان بالاترین درصد‌های مساحت مناطق بدون تغییر را به ترتیب معادل ۲۷، ۲۶، ۱۴، و ۱۳ درصد نشان دادند. قره‌قوم و درانجیر حدود ۸ درصد مساحت نواحی فرونشست خود را بدون تغییر داشته‌اند. باقی حوزه‌ها زیر ۲ درصد از مساحت خود را بدون تغییر داشته‌اند (شکل ۱۳).

با توجه به نتایج بیشترین درصد مساحت کلاس‌های بدون تغییر کم، متوسط، و شدید به ترتیب در تهران-کرج (۹۵٪)، جیرفت (۱۵،۲۵٪)، و سگزی (۲۸٪) است. مساحت کلاس کاهش متوسط به کم تنها در محدوده تهران-کرج دیده شد. اما بیشترین درصد مساحت کلاس کاهش شدید به متوسط در رفسنجان (۵۱٪) است. بیشترین درصد مساحت کلاس افزایشی کم به متوسط، متوسط به شدید، و کم به شدید به ترتیب در تهران-کرج (۴۰٪)، سگزی (۱۶٪)، و مشهد (۹۶٪) است.

با توجه به اثر فراوانی که شاخص‌های معیار آب در گسترش عرصه‌های بیابانی دارند، مطالعات پیشین نیز به بررسی تخریب سرزمین با معیارهای خاک و آب زیرزمینی بالاخص افت سطح آب و شوری خاک اشاره داشته‌اند (Uzuner et al., 2020؛ نصیریان و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۳؛ مسعودی و همکاران، ۱۳۹۴: ۷۲۰؛ کاویانی‌آهنگر و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۶۰؛ شاهینی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۴). شوری یا افزایش غلظت نمک‌ها در خاک به‌خصوص در مناطق کم‌باران و خشک و بیابانی شوری خاک را به وجود آورده که می‌تواند ناشی از تبخیر زیاد آب، آبیاری نامناسب، و استفاده نادرست از منابع آب زیرزمینی باشد (خانی‌بندانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰۰). بر این اساس، ارتباط مستقیم و معناداری بین تخریب سرزمین و شوری وجود دارد که موجب عدم استفاده از زمین کشاورزی و رها شدن آن‌ها می‌شود. ارتباط بین شوری، فرونشست، و بیابان‌زایی به این صورت است که شوری خاک می‌تواند به عنوان یک عامل محدودکننده در رشد گیاهان عمل کند و به تضعیف پوشش گیاهی منجر شود. از طرفی، فرونشست می‌تواند موجب کاهش سطح آب زیرزمینی و خشکی در خاک شود و در نتیجه شوری خاک را تشدید کند (Dinar et al., 2021: 14). و در نهایت بیابان‌زایی می‌تواند نتیجه شوری خاک و فرونشست باشد. چون کاشته نشدن گیاهان به دلیل کیفیت نامناسب خاک منجر به کاهش پوشش گیاهی و افزایش بیابانی شدن مناطق خواهد شد (Kosmas & Kairis, 2017: 240). بنابراین، می‌توان گفت این سه پدیده به طور مستقیم و غیر مستقیم به یک‌دیگر وابسته‌اند و هر یک می‌تواند بر دیگری تأثیر بگذارد.

افت آب زیرزمینی می‌تواند منجر به بیابان‌زایی و کاهش کیفیت زمین‌های حاصلخیز شود که در نهایت به دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی مخزن‌های زیرزمینی خالی و منجر به فرونشست زمین می‌شود همانند آنچه در اندونزی (Lo et al., 2022)، پاکستان (Anjum et al., 2010: 1205)، افریقا (Zalibekov et al., 2019: 80)، ماهیدشت (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۲۱۴)، جاجرود (عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۸۰)، و دشت صوفیان (روستایی و همکاران، ۱۴۰۱: ۷۰) روی داده است.

در نهایت، بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب و خاک می‌تواند به مشکلات جدی محیط زیستی و از دست رفتن این منابع منجر شود. مدیریت مناسب منابع آب و استفاده پایدار از آن می‌تواند به کاهش این پدیده‌ها کمک کند و وضعیت اکوسیستم‌ها و منابع طبیعی را بهبود بخشد.

میزان سدیم خاک نقش مؤثری در پراکندگی کلوئیدهای رسی و انهدام ساختمان خاک و در نتیجه کاهش نفوذپذیری (جهان تیغ و جهان تیغ، ۱۴۰۲) و در نهایت روند بیابان‌زایی دارد. همچنین، مطالعات پیشین به نقش سدیم قابل جذب، مواد آلی، و سایر نمک‌ها بر افزایش روند بیابان‌زایی نیز اشاره کردند (Khanamani et al., 2017:9) که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد.

مطالعات پیشین دلایل متعددی - از جمله شواهد زوال پوشش گیاهی (رضایی و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۵۰؛ دشتی و همکاران، ۱۴۰۱: ۵۱)، کاهش محصولات کشاورزی و افزایش گرد و غبار (عباسی، ۱۴۰۰: ۱۷۲)، فرونشست زمین (صالح و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۸۰)، شور شدن خاک (امینی و همکاران، ۱۳۹۶: ۴۰)، تجمع ماسه در روستاها و اراضی کشاورزی و مراتع اطراف آن‌ها (اصغری لقمجانی و نادریان‌فر، ۱۳۹۴: ۲۵) - سبب تخریب سرزمین دانسته‌اند. نتایج مطالعه حاضر، ضمن تکمیل مرور منابع، وجود فرونشست زمین را نیز به شواهد تخریب سرزمین می‌افزاید.

از دیدگاه حفاظت از محیط زیست نیز تخریب سرزمین به صورت کمبود منابع آب، شوری آب، تخریب مراتع، نابودی پوشش گیاهی، تشدید فرسایش بادی، و افزایش روزهای توأم با گرد و غبار منجر به چالش‌های اقتصادی - اجتماعی در منطقه می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۵۰). مرور منابع در ارتباط با چالش‌های اقتصادی - اجتماعی تحت تأثیر تخریب سرزمین نشان می‌دهد اغلب فقیرترین و آسیب‌پذیرترین قشر جامعه روستایی در کشورهای در حال توسعه تحت تأثیر پیامدهای مخرب و مخاطرات طبیعی و تخریب سرزمین قرار دارند؛ که میتوان علت را در وابستگی معیشت آن‌ها به منابع طبیعی (Long et al., 2015: 57) که مقصود منابع آب‌های زیرزمینی و زمین‌های کشاورزی است، توجیه نمود.

در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته، جوامع روستایی و خانواده‌های کم‌درآمد در برابر شوک‌های طبیعی و مراحل بازیابی آسیب‌پذیری بیشتری دارند و تخریب سرزمین در این مناطق عمدتاً منجر به افزایش آمار بی‌کاری و مهاجرت به حاشیه شهرهای صنعتی می‌شود (شاهسوندی و همکاران، ۱۳۸۹: ۴۹). تخریب سرزمین محرک فوری در کاهش فعالیت‌های کشاورزی و افزایش قیمت مواد غذایی است و موجب مهاجرت گسترده روستاییان به مناطق شهری و کشمکش و درگیری بر سر منابع زمین موجود - مانند زمین‌های کشاورزی، چراگاه، زمین‌های خانگی، آب، مواد معدنی، و جنگل‌ها - می‌شود (Eneji et al., 2015: 239). همچنین، مهاجرت گسترده روستایی به شهر منجر به فروپاشی گسترده زیرساخت‌های شهری، جرم و جنایت، و پیدایش محله‌های فقیرنشین شهری و سکونت‌گاه‌های پراکنده شده است (Danladi & Ray, 2014: 101).

بر این اساس، تهیه نقشه تخریب سرزمین، همانند آنچه در پژوهش حاضر معرفی شد، اساس و زمینه‌ای برای برنامه‌ریزی منطقی و جلوگیری از گسترش آن به واسطه همراهی سایر عوامل مؤثر تخریب است که ضمن تعیین هر یک از شاخص‌های مؤثر بر تخریب نقش‌های نهایی از تخریب سرزمین را برای استفاده کاربران و مدیران اراضی در منطقه ارائه می‌دهد. گفتنی است هدف اصلی از نقشه تخریب سرزمین تقویت آگاهی تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران در مورد خطرات ناشی از مدیریت نامناسب منابع آب‌های زیرزمینی و خاک برای رفاه و ایجاد مبنایی برای تعیین اولویت‌ها برای برنامه‌های اجرایی است (Lukic et al., 2022: 165).

نتیجه و پیشنهاد

تخریب سرزمین در مناطق خشک و بیابانی منجر به گسترش بیابان‌زایی می‌شود که برآیند فرایندهای پیچیده‌ای است که در اثر برهم‌کنش متغیرهای مختلف ایجاد می‌شود. این متغیرها می‌تواند عوامل بیرونی و درونی اکوسیستم باشد که در طی زمان به وجود می‌آید. نظر به فراوانی گزارش‌های فرونشست زمین در مناطق مختلف ایران در دهه‌های اخیر، که عمدتاً ناشی از کشاورزی و برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی است، در پژوهش حاضر، ضرورت بررسی معیارهای فرونشست زمین به همراه کمیت و

کیفیت آب زیرزمینی در گسترش تخریب سرزمین با استفاده از مدل اصلی IMDPA که سازگار شده با شرایط ایران است و بار دیگر با توسعه مدل اصلی در یازده حوزه آبریز ایران نشان داده شد.

نتایج نشان داد مدل انتخابی IMDPA از کارایی خوبی برخوردار است و می‌تواند تا حدود زیادی به شناخت معضلات طبیعی موجود در محدوده مورد مطالعه، وضعیت بالفعل، و روند بیابان‌زایی در طول زمان کمک کند و به طور کلی به عنوان یک بانک اطلاعاتی از شرایط طبیعی و اکولوژیک استفاده شود. مقایسه نتایج کلاس‌های شدت تخریب سرزمین محاسبه‌شده در مناطق دارای فرونشست با استفاده از دو مدل مشتمل بر مدل اصلی IMDPA و مدل توسعه‌یافته IMDPAS (سناریوی ۱ و ۲) نشان داد درصد تغییرات کلاس‌های شدت تخریب سرزمین با استفاده از مدل توسعه‌یافته منجر به افزایش ۴۲ درصدی کلاس شده که ۳۷ درصد آن افزایشی متوسط به شدید است. همچنین، بیشترین تغییرات افزایشی در حوزه‌های آبریز دریاچه نمک، گاوخونی، و کویر مرکزی است.

با توجه به نتایج پژوهش حاضر، می‌توان اذعان داشت که فرونشست از علل تقویت تخریب سرزمین در اکوسیستم‌های حساس در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در اکوسیستم‌های حساس از جمله نشانه‌های تخریب سرزمین کاهش دسترسی به منابع آبی، به‌ویژه آب‌های زیرزمینی، است که خود می‌تواند موجب فرونشست زمین شود. همچنین، تخریب سرزمین می‌تواند باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شود که موجب کاهش توانایی خاک در حفظ رطوبت و افزایش دما نیز می‌شود و این موضوع نیز به افزایش فرونشست زمین کمک خواهد کرد.

از منظر تأثیرات اجتماعی-اقتصادی، هر دو پدیده تخریب سرزمین و فرونشست زمین می‌توانند به زوال شرایط معیشتی جوامع محلی منجر شوند که به نوبه خود می‌تواند به مهاجرت‌های اجباری و فشارهای بیشتر بر منابع موجود بینجامد. بنابراین، تخریب سرزمین و فرونشست زمین می‌توانند به عنوان دو پدیده متقابل و هم‌افزا در نظر گرفته شوند که مهم است برای مدیریت و مقابله با آن‌ها به طور یکپارچه و جامع اقدام شود.

فرونشست منجر به تغییراتی همچون کاهش ظرفیت خاک، افزایش فرسایش خاک و گرد و غبار، تغییر تنوع زیستی در اکوسیستم، تأثیر بر فعالیت‌های انسانی با انحراف آب‌های سطحی، کاهش کیفیت زندگی، و تأثیر منفی بر کشاورزی و معیشت مردم می‌شود که همه این عوامل می‌تواند به گستردگی تخریب سرزمین کمک کند. بر این اساس، فرونشست زمین نه تنها تأثیر مستقیم بر محیط زیست دارد، بلکه می‌تواند به عنوان یک عامل غیر مستقیم در تشدید تخریب سرزمین و تغییرات اقلیمی عمل کند. شناخت و مدیریت این پدیده برای مقابله با خطرات آن ضروری است.

اقدامات اجرایی- مدیریتی نظیر تهیه دستورالعمل فنی استفاده از آب‌های زیرزمینی، استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار، اجرای شایسته طرح تعادل بخشی وزارت نیرو، و اجرای برنامه‌های مدیریتی جهت حفظ پوشش گیاهی جنگل‌ها و مراتع و نیز اصلاح الگوی کشت توصیه می‌شود. همچنین، اقدامات پژوهشی همانند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌ها و شدت بیابان‌زایی مانند آنچه در پژوهش حاضر اجرا شد می‌تواند قابلیت استفاده توسط کارشناسان جهت آمایش سرزمین و ارائه راهکارهای پیشنهادی و اعمال روش‌های مدیریتی مناسب با هدف جلوگیری از گسترش و پیشروی اراضی شور و بیابانی را داشته باشد. چنانچه مدیریتی صحیح در کنترل و پیشگیری روند تخریب سرزمین در مناطق حساس در حوزه‌های مورد مطالعه صورت نپذیرد، در آینده‌ای نه چندان دور به مساحت اراضی با شدت تخریب شدید و ورود کلاس خیلی شدید افزوده خواهد شد.

سپاسگزاری

این اثر برگرفته از بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی ملی با عنوان «مطالعات تخریب خاک و فرونشست تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی در دشت‌های ایران» با کد ۹۹۰۵۴۳-۹۹۰۲۵-۰۳۰-۰۹-۰۹-۰۱ و مصوب در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور است. نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند از همکاری و پشتیبانی آن مؤسسه سپاسگزاری و قدردانی کنند.

منابع

- اصغری لقمجانی، ص. و نادریان فر، م. (۱۳۹۴). تحلیل فضایی اثرات ماسه‌های روان در روستاهای شهرستان هیرمند. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۷ (۱۸)، ۳۰-۵.
- امینی، د؛ توکلی، م. و رستمی‌نیا، م. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی و بررسی روند شوری خاک با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و آنالیزهای زمین آماری (مطالعه موردی: شادگان، خوزستان). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۷ (۴)، ۲۴-۴۳.
- انتظاری زارچ، الف؛ احمدی، ح؛ معینی، الف. و پذیرا، الف. (۱۴۰۱). ارزیابی تخریب سرزمین با بهره‌گیری از مدل جهانی ارزیابی تخریب خاک و مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی (مطالعه موردی: دشت یزد - اردکان). *مدیریت بیابان*، ۱۰ (۴)، ۱-۲۰.
- احمدی، ح؛ اسماعیل‌پور، ی؛ مرادی، ع. و غلامی، ح. (۱۳۹۸). ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی حوضه آبخیز جازموریان با استفاده از مدل‌های ESAs و IMDPA. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ج ۸، ش ۲۲، ۷۳-۸۸.
- اختصاصی، م. و سپهر، ع. (۱۳۹۰). *روش‌ها و مدل‌های ارزیابی و تهیه نقشه بیابان‌زایی*. یزد: دانشگاه یزد.
- اونق، م؛ رضانی، ن؛ سلمان‌ماهینی، ع. و سپهر، ع. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر بیابان‌زایی استان خراسان شمالی با استفاده از مدل‌های IMDPA و MICD. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۹ (۲۶)، ۲۹-۴۲.
- برزگر، س. مسعودی، م. (۱۳۹۸). ارزیابی شدت تخریب منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل اصلاحی بیابان‌زایی IMDPA و GIS در دشت شیراز استان فارس. *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۱ (۳)، ۴۷-۵۷.
- بهینیا، م؛ زهتابیان، غ؛ خسروی، ح؛ احمدآلی، خ؛ نظری سامانی، ع. و مصباح‌زاده، ط. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط بین معیارهای بیابان‌زایی و تغییر کاربری اراضی: ارائه مدل‌ولوژی عملیاتی پایش با استفاده از مدل IMDPA. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۲۹، ۶۹-۸۶.
- تورانی، م؛ آق‌آتابای، م. و روستایی، م. (۱۳۹۷). مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۱۷ (۲۷)، ۱۱۷-۱۲۸.
- توکلی، م؛ نوری‌نژاد، ش. و رستمی‌نیا، م. (۱۳۹۶). ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های ICD و ESAs در تهیه نقشه بیابان‌زایی دشت مهران، ایلام. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۴ (۴)، ۸۵۳-۸۶۹.
- جمور، ر؛ ایل‌بیگی، م. و مرسلی، م. (۱۳۹۷). ارزیابی بحران فرونشست زمین و پیشروی آب شور دریا در آبخوان دشت میناب. *اکوهیدرولوژی*، د ۱۶ (۱)، ۲۲۳-۲۳۸.
- جهان‌تیغ، م. و جهان‌تیغ، م. (۱۴۰۲). تأثیر آب شور و نوع آبیاری بر رطوبت و ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک. *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۲ (۴)، ۶۷-۷۸.
- حاجی‌ملکی، خ؛ موسوی، ر؛ گرجی، م. و سرمدیان، ف. (۱۳۹۴). تهیه نقشه تخریب خاک بر مبنای روش ژئوپدولوژی و مدل گلاسود با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی در شرق استان قزوین. *مرتع و آبخیزداری*، ۶۸ (۴)، ۸۵۳-۸۶۷.
- خانی‌بندانی، ل. و جعفری، ه. (۱۳۹۸). بهره‌گیری از معیارهای شاخص روش IMDPA در پهنه‌بندی شدت بیابان‌زایی منطقه جنوب شرق زاهدان. *جغرافیای طبیعی*، ۱۲ (۴۵)، ۸۷-۱۰۵.
- رایگانی، ب؛ زهتابیان، غ. و براتی، س. (۱۳۹۲). نقدی بر مدل ایرانی ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی (IMDPA). *بوم‌شناسی کاربردی*، ۲ (۴)، ۷۳-۹۹.
- دهقانی بیدگلی، ر؛ کوهبنانی، ح؛ یزدانی، م. و دشتی‌امیرآباد، ج. (۱۳۹۷). ارزیابی خطر تخریب سرزمین و شدت بیابان‌زایی با استفاده از روش فازی (مطالعه موردی: منطقه میان‌دهی استان خراسان رضوی). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۵ (۴)، ۸۷۷-۸۸۷.
- رضایی، م؛ نیکو، ش. و کابلی، ح. (۱۴۰۲). بررسی اثرات بیابان‌زایی بر وضعیت اقتصادی-اجتماعی مناطق روستایی (مطالعه موردی: روستاهای کلاته‌های شرقی شهرستان میامی). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۶ (۲)، ۲۳۰-۲۵۶.
- رنجبر باروق، ز. و فتح‌الله‌زاده، م. (۱۴۰۱). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۰ (۴)، ۱۳۸-۱۵۵.
- روستایی، ش؛ رضایی‌مقدم، م؛ یاراحمدی، ج. و نجف‌وند، س. (۱۴۰۱). آشکارسازی فرونشست جهت پایداری زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری با پراکنشگرهای دائمی (مطالعه موردی: دشت شبستر- صوفیان). *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*، ۱۲ (۴۴)، ۵۷-۷۴.
- زهتابیان، غ؛ احمدی، ح؛ اختصاصی، م.ر. و خسروی، ح. (۱۳۸۶). واسنجی مدل مدالوس به منظور ارائه یک مدل منطقه‌ای برآورد شدت بیابان‌زایی در منطقه کاشان. *منابع طبیعی ایران*، ۶۰ (۳)، ۷۲۷-۷۴۴.

- زهتابیان، غ.؛ خسروی، ح. و مسعودی، ر. (۱۳۹۳). مدل‌های ارزیابی بیابان‌زایی (معیارها و شاخص‌ها). تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- عمادالدین، س.؛ محمدقاسمی، م. و قریشی، د. (۱۴۰۲). بررسی فرورفتستت زمین به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت فسا. *مهندسی جغرافیایی سرزمین*، ۷(۴)، ۷۶۷ - ۷۷۸.
- فتاحی، م.؛ درویش، م.؛ جاویدکیا، ح. و ادنایی، س. م. (۱۳۸۹). ارزیابی و تهیه نقشه خطر کل بیابان‌زایی با روش فائو-یونپ (مطالعه موردی: حوزه آبخیز قم‌رود). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۷(۴)، ۵۷۵ - ۵۸۸.
- صالحی‌متعهد، ف.؛ حافظی‌مقدس، ن.؛ لشکری‌پور، غ. و دهقانی، م. (۱۳۹۸). ارزیابی فرورفتستت زمین به کمک تلفیق روش تداخل‌سنجی راداری و اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد. *زمین‌شناسی مهندسی*، ۱۳(۳)، ۴۳۵ - ۴۶۳.
- عابدینی، م.؛ عبادی، الف. و قلعه، الف. (۱۴۰۱). بررسی فرورفتستت دشت ماهیدشت استان کرمانشاه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶(۷۹)، ۲۰۷ - ۲۲۰.
- عمادالدین، س.؛ شاهی، و.؛ آرخی، ص. و آق‌آتابای، م. (۱۴۰۱). تعیین میزان فرورفتستت زمین در محدوده مخروط‌افکنه جاجرود با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۴(۲)، ۱۶۹ - ۱۸۳.
- کاوایی‌آهنگر، س.؛ مهدوی نجف‌آبادی، ر.؛ زهتابیان، غ.؛ غلامی، ح. و چاپاگین، آ. (۱۴۰۰). ارزیابی کیفی و کمی وضعیت منبع‌های آب و کشاورزی در زیرآبخیز سروستان، استان فارس. *پژوهش‌های آبخیزداری*، ۳۴(۳)، ۱۴۹ - ۱۶۴.
- کرامت‌زاده، م.؛ فتحی، الف. و معاضد، ه. (۱۴۰۱). بررسی روند بیابان‌زایی منطقه جنوب شرق اهواز به روش IMDPA و تأکید بر دو معیار اقلیم و پوشش گیاهی. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۱)، ۱۵۳ - ۱۶۶.
- مسعودی، ر.؛ زهتابیان، غ.؛ احمدی، ح. و خلیقی سیگارودی، ش. (۱۳۹۴). ارزیابی بیابان‌زایی بر اساس دو معیار آب و اقلیم (مطالعه موردی: دشت کاشان). *مرتع و آبخیزداری*، ۶۸(۴)، ۷۱۱ - ۷۲۳.
- نظم‌فر، ح. و شیرزادگرجان، م. (۱۴۰۱). پایش فرورفتستت سطح زمین با تکنیک تداخل‌سنجی راداری (محدوده مورد مطالعه: دشت مشگین). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۱)، ۲۵ - ۴۸.
- یمانی، م.؛ نجفی، الف. و عابدینی، م. (۱۳۸۸). ارتباط فرورفتستت زمین و افت سطح آب‌های زیرزمینی در دشت قره‌بلاغ استان فارس. *جغرافیا*، ۳(۸-۹)، ۹ - ۲۷.
- AbdelKawy, W. A. M. & Darwish, K. M. (2019). Assessment of land degradation and implications on agricultural land in Qalyubia Governorate, Egypt. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1), 70.
- Abedini, M., Ebady, E., & Ghale, E. (2022). Investigation of subsidence of Mahidasht plain of Kermanshah province using radar interferometry method. *Journal of Geography and Planning*, 26(79), 220-207. (in Persian)
- Ahmadi, H., Ismailpour, Y., Moradi, A., & Gholami, H. (2018). Assessing the desertification status of Jazmurian watershed using ESAs and IMDPA models. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, Vol. 8, No. 22, 73-88. (in Persian)
- Aliero, M. M., Ismail, M. H., Alias, M. A., & Sood, A. M. (2021). Geospatial analysis of desertification vulnerability using Mediterranean desertification and land use (MEDALUS) model in Kebbi State, Nigeria. *Applied Geomatics*, 1-10.
- Anjum, S. A., Wang, L. C., Xue, L. L., Saleem, M. F., Wang, G. X., & Zou, C. M. (2010). Desertification in Pakistan: Causes, impacts and management. *J. Food Agric. Environ*, 8(1), 1203-1208.
- Barrow, C. J. (1991). *Land degradation: development and breakdown of terrestrial environments*. Cambridge University Press.
- Barzegar, S. & Masoudi, M. (2018). Assessment of the severity of the destruction of underground water resources using the IMDPA desertification correction model and GIS in the Shiraz plain of Fars province. *Environmental Science and Technology Quarterly*, 21(3), 47-57. (in Persian)
- Behnia, M., Zehtabian, G., Khosravi, H., Ahmadali, K., Nazari Samani, A., & Mesbahzadeh, T. (2021). Investigating the relationship between desertification criteria and land use change and providing operational monitoring methodology Using IMDPA. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 69-86. (in Persian)
- Bouhata, R. & Bensekhria, A. (2021). Adaptation of MEDALUS method for the analysis depicting desertification in Oued Labiod valley (Eastern Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1-12.
- Cigna, F. & Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112254.
- Danladi, A. & Ray, H.H. (2014). Socio-economic effect of gully erosion on land use in Gombe Metropolis, Gombe State, Nigeria. *Journal of Geography and Regional Planning*, 7(5), 97-105.

- Dinar, A., Esteban, E., Calvo, E., Herrera, G., Teatini, P., Tomás, R., Li, Y., Ezquerro, P., & Albiac, J. (2021). We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of the Total Environment*, 786, 147415.
- Ekhtesasi, M. & Sepehr, A. (2011). *Evaluation methods and models and preparation of desertification map*. Publisher: Yazd University. (in Persian)
- Emadodin, S., Shahi, V., Arekhi, S., & Agh Atabay, M. (2022). Determining the Amount of Land Subsidence in Jajrood Alluvial Fan Using Differential Radar Interferometry Technique. *Physical Geography Research*, 54(2), 169-183. (in Persian)
- Emadodin, S., Mohammadghasemi, M., & Ghoreishi, D. (2024). Land Subsidence Assessment due to Groundwater Exploration by using Radar Interferometry Technique, Case Study: Fasa Plain. *Geographical Engineering of Territory*, 7(4), 767-778. (in Persian)
- Eneji, M., Qijie, G., Eneji, R., & Birame, B. (2010). Socio-Economic Impacts of Desertification in Nigeria. *Annals of Humanities and Development Studies*, 1(2), 242-254.
- Entezari Zarch, A., Ahmadi, H., Moeini, A. M., & Pazira, E. (2023). Assessment of Land Degradation Using GLASOD and IMDPA Models (Case study: Yazd-Ardakan plain). *Desert Management*, 10(4), 1-20. (in Persian)
- Fattahi, M. M., Darvish, M., Javidkia, H. R., & Adnani, M. (2011). Assessment and mapping of desertification total risk using FAO-UNEP method (case study: Qomroud watershed). *Range And Desert Research*, 17(4 (41)), 575-588. (in Persian)
- Gichenje, H., Pinto-Correia, T., & Godinho, S. (2019). An analysis of the drivers that affect greening and browning trends in the context of pursuing land degradation-neutrality. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15, 100251.
- Haji Maleki, K., Mousavi, S. R., Gorji, M., & Sarmadian, F. (2016). Mapping soil degradation based on geopedological method and GLASOD model using GIS in east QAZVIN province. *Range and Watershed Management*, 68(4), 853-867. (in Persian)
- Jamour, R., Eilbeigy, M., & Morsali, M. (2019). Assessment of the land subsidence crisis and the advent of salt water in the Minab plain aquifer. *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(1), 223-238. (in Persian)
- Jiang, L., Jiapaer, G., Bao, A., Li, Y., Guo, H., Zheng, G., ... & De Maeyer, P. (2019). Assessing land degradation and quantifying its drivers in the Amudarya River delta. *Ecological Indicators*, 107, 105595.
- Kacem, H. A., Fal, S., Karim, M., Alaoui, H. M., Rhinane, H., & Maanan, M. (2019). Application of fuzzy analytical hierarchy process for assessment of desertification sensitive areas in North West of Morocco. *Geocarto International*, 1-18.
- Kaviani-Ahangar, S., Mahdavi Najafabadi, R., Zehtabian, G., Gholami, H., & Chapagain, A. K. (2021). Qualitative and Quantitative Assessment of Water Resources and Agriculture in Sarvestan Sub-basin, the Province of Fars. *Watershed Management Research Journal*, 34(3), 149-164. (in Persian)
- Keramatzadeh, M., Fathi, A., & Moazed, H. (2022). Investigate the situation of desertification in south east Ahvaz region using IMDPA model with emphasis on the criteria climate and vegetation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1), 153-166. (in Persian)
- Khanamani, A., Fathizad, H., Karimi, H., & Shojaei, S. (2017). Assessing desertification by using soil indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 10, 1-10.
- Khani Bandani, L. & Jafari, H. (2018). Utilization of IMDPA method index criteria in zoning the intensity of desertification in the southeast region of Zahedan. *Natural Geography*, 12(45), 87-105. (in Persian)
- Kosmas, C. & Kairis, O. (2017). *Environmental hazards methodologies for risk assessment and management*. Chapter 6 – Land desertification. IWA Publishing, London.
- Lo, W., Purnomo, S. N., Dewanto, B. G., & Sarah, D. (2022). Integration of numerical models and InSAR techniques to assess land subsidence due to excessive groundwater abstraction in the coastal and lowland regions of Semarang city. *Water*, 14(2), 201.
- Long, R.D., Charles, A., & Stephenson, R.L. (2015). Key principles of marine ecosystem-based management. *Marine Policy*, 57, 53-60.
- Lukic, S., Baumgartel, A., Obradovic, S., Kadovic, R., Beloica, J., Pantic, D., Miljkovic, P., & Belanovic Simic, S. (2022). Assessment of land sensitivity to degradation using MEDALUS model-a case study of Grdelica Gorge and Vranjska Valley (southeastern Serbia). *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 15(3), 163.
- Ma, K., Zhang, Y., Ruan, M., Guo, J., & Chai, T. (2019). Land subsidence in a coal mining area reduced soil fertility and led to soil degradation in arid and semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20), 29-39.
- Machowski, R., Rzetala, M.A., Rzetala, M., & Solariski, M. (2016). Geomorphological and hydrological effects of subsidence and land use change in industrial and urban areas. *Land Degradation & Development*, 27(7), 1740-1752.

- Masoudi, R., Zahtabian, G., Ahmadi, H., & Khaleghi Sigaroudi, S. (2014). Evaluation of desertification based on two criteria of water and climate (case study: Kashan Plain). *Pasture and watershed scientific-research journal*, 68(4), 711-723. (in Persian)
- Nazmfar, H. & Khrjan, S. (2022). Surface subsidence monitoring with radar interference technique (study area: Meshgin plain). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(31), 25-48. (in Persian)
- Nikpour, N., Fotoohi, S., Hosseini, S. Z., Negaresh, H., & Bahrami, S. (2022). An assessment of land degradation and its effects on geomorphology using LADA model: a case study of Ilam Province, west of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 81(10), 1-25.
- Nkonya, E., Gerber, N., Baumgartner, P., von Braun, J., De Pinto, A., Graw, V., Kato, E., Kloos, J., & Walter, T. (2011). *The economics of land degradation: toward an integrated global assessment*. Development economics and policy series: Peter Lang GmbH, Frankfurt. Vol. 66.
- Ownegh, M., Ramezani, N., Salman Mahini, A., & Sepehr, A. (2020). Assessing desertification hazards in north khorasan province via MICD and IMDPA models. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 9(26), 29-42. (in Persian)
- Okpara, U. T., Stringer, L. C., Akhtar-Schuster, M., Metternicht, G. I., Dallimer, M., & Requier-Desjardins, M. (2018). A social-ecological systems approach is necessary to achieve land degradation neutrality. *Environmental science & policy*, 89, 59-66.
- Peng, M., Lu, Z., Zhao, C., Motagh, M., Bai, L., Conway, B. D., & Chen, H. (2022). Mapping land subsidence and aquifer system properties of the Willcox Basin, Arizona, from InSAR observations and independent component analysis. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112894.
- rr äeeeeε,,, Ptt,,,,, ,, , ääueεc,, ,, rrr ooee,, .. , aa cccc , .. & Sîi,,, .. (..... .. ttal ssssss ttt ff aad sensitivity to degradation across Romania. A quantitative approach based on the modified MEDALUS methodology. *Catena*, 187, 104407.
- Radda, I. A., Kumar, B. M., & Pathak, P. (2021). Land degradation in Bihar, India: an assessment using rain-use efficiency and residual trend analysis. *Agricultural Research*, 10(3), 434-447.
- Ranjbar Barough, Z. & Fathallahzadeh, M. (2022). Investigation of land subsidence, using time series of radar images and its relationship with groundwater level changes (Case study: Karaj metropolis). *Quantitative Geomorphological Research*, 10(4), 138-155. (in Persian)
- Raygani, B., Zahtabian, G., & Brati, S. (2012). A critique on the Iranian model of desertification potential assessment (IMDPA). *Applied Ecology*, 2(4), 73-99. (in Persian)
- Raushi, S., Rezaei Moghadam, M., Yarahamdi, J., & Najafond, S. (2022). Detection of subsidence for earth stability using radar interferometric method with permanent scatterers (case study: Shabster-Sofian Plain). *Geography and Environmental Sustainability (Geographic Research)*, 12(44), 57-74. (in Persian)
- Rezaei, M. A., Nikoo, S., & Kaboli, S. H. (2023). Investigating the effects of desertification on socio-economic status of rural areas (Case Study: Eastern Kalatea villages of Miami). *Geography and Human Relationships*, 6(2), 230-256. (in Persian)
- Riva, M. J., Daliakopoulos, I. N., Eckert, S., Hodel, E., & Liniger, H. (2017). Assessment of land degradation in Mediterranean forests and grazing lands using a landscape unit approach and the normalized difference vegetation index. *Applied geography*, 86, 8-21.
- Salehi, F., Hafizi Moghads, N., Lashkaripour, G., & Deghani, M. (2018). Evaluation of ground subsidence by combining radar interferometric method and field measurements and investigating its causes and effects on Mashhad city. *Engineering Geology*, 13(3), 435-463. (in Persian)
- Shao, Y., Jiang, Q. O., Wang, C., Wang, M., Xiao, L., & Qi, Y. (2020). Analysis of critical land degradation and development processes and their driving mechanism in the Heihe River Basin. *Science of the Total Environment*, 716, 137082.
- Silakhori, E. (2015). Mapping of desertification hazard intensity based on soil index using ESAs methodology in Mazinan of Sabzevar. *Journal of Emergency Management*, 3(2), 57-63.
- Sun, B., Li, Z., Gao, Z., Guo, Z., Wang, B., Hu, X., & Bai, L. (2017). Grassland degradation and restoration monitoring and driving forces analysis based on long time-series remote sensing data in Xilin Gol League. *Acta Ecologica Sinica*, 37(4), 219-228.
- Tang, W., Zhao, X., Motagh, M., Bi, G., Li, J., Chen, M., ... & Liao, M. (2022). Land subsidence and rebound in the Taiyuan basin, northern China, in the context of inter-basin water transfer and groundwater management. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112792.
- Tavakoli, M., Nourinejad, S., & Rostaminia, M. (2017). Evaluation and comparison of ICD and ESAs models for desertification zonation in Mehran plain, Ilam. *Range and Desert Research*, 24(4), 853-869. (in Persian)
- Tiwari, N. D. & Mishra, D. (2022). Geospatial analysis of land degradation by fuzzy membership algorithm in reference to Satna river basin in northern foreland of Peninsular India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), 1-23.

- Torani, M., Agh-Atabai, M., & Raushi, M. (2017). Subsidence study in Gorgan using radar interferometric method. *Geographical analysis of space*, 8(27), 117-128. (in Persian)
- United Nations Convention to Combat Desertification (1994). United nations convention to combat desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa. A/AC, 241-27, Paris, 234p.
- Uzuner, Ç. & Dengiz, O. (2020). Desertification risk assessment in Turkey based on environmentally sensitive areas. *Ecological Indicators*, 114, 106295.
- Yamani, M., Najafi, A., & Abedini, M. (2009). The relationship between ground subsidence and groundwater level drop in the Qara Balag plain of Fars province. *Geography*, 3(8-9), 9-27. (in Persian)
- Zalibekov, Z. G., Mamaev, S. A., Biarslanov, A. B., Magomedov, R. A., Asgerova, D. B., & Galimova, U. M. (2019). The use of fresh groundwater from arid regions of the world in the fight against land desertification. *Arid ecosystems*, 9, 77-84.
- Zehtabian, G., Ahmadi, H. M.R., & Khosravi, H. (2007). Recalibration of the Medalos model in order to provide a regional model for estimating the intensity of desertification in Kashan region. *Natural Resources of Iran*, 60 (3), 727-744. (in Persian)
- Zehtabian, G., Khosravi, H., & Masoudi, R. (2013). *Desertification assessment models (criteria and indicators)*. Tehran: University of Tehran. (in Persian)
- Zou, T. & Yoshino, K. (2017). Environmental vulnerability evaluation using spatial principal components rrr ttt tt t tt Daaaaaaiaa iii iii ii ia. *Ecological Indicators*, 78, 405-415

